覆沙坡面微地形变化与侵蚀产沙的响应关系①

张建文，李　鹏，高海东，杨倩楠，刘　展
（西安理工大学，旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室，陕西 西安　710048）

摘　要：坡面微地形的发育反映了侵蚀的强度及变化过程。为了定量研究不同覆沙厚度下坡面的微地形变化与侵蚀之间的响应，通过模拟 1.5 mm·min^{-1}雨强下的 3 场连续降雨试验，结合三维激光扫描仪技术，分析了坡面微地形与土壤侵蚀的空间变化特征，较好地拟合了微地形变幅与侵蚀量之间的关系。结果表明：坡面平均含沙量随着降雨场次的增加而减小。覆沙坡面主要产沙区的长度是黄土坡面的 3 倍左右，且坡段侵蚀量的峰值多分布在坡面 4～6 m 的位置，而黄土坡面侵蚀峰值分布在 3～4 m 的位置。随着降雨场次的增加，黄土坡面微地形因子显著增大（$P<0.05$），覆沙坡面微地形因子总体呈增大趋势，但并不显著（$P>0.05$）。与黄土坡面和覆沙坡面的侵蚀响应最强烈的微地形因子分别为地表切割深度和地表粗糙度，黄土坡面微地形变幅与侵蚀量的响应关系较强于覆沙坡面，覆沙坡面应寻找其他敏感的指标对方程进行优化。该研究为揭示风水复合侵蚀地区的侵蚀机理提供一定参考。

关键词：覆沙坡面；侵蚀；空间分布；微地形；含沙量；土壤侵蚀

地表微地形伴随着土壤侵蚀的发生和演变，其通过变化不同的高程位置点来影响坡面水流的流向和水力学特性，进而影响土壤侵蚀状况[1-2]。微地形对土壤侵蚀有促进[3-4]和阻碍[5-6]两种不同的作用，其主要原因是微地形变化的高动态性和随机性[7]。因此，探究坡面侵蚀过程中的产流产沙特征和微地形变化是研究侵蚀机理的重要内容[8]。赵龙山等[9]研究发现，地表糙度与微坡度存在显著的线性关系，并且地表糙度对侵蚀的响应有一定的空间差异性。另外，在横垄坡面，运用地表糙度变幅能够较好地预测坡面侵蚀量[10]。而微地形因子能够在一定的空间范围内影响坡面雨水的汇流路径，用激光微地貌扫描能够高精度地提取和分析地形指标[11]，从而可以更加精准地分析降雨条件下坡面微地形的空间差异性。而黄土高原风蚀水蚀交错区由于其土壤抗冲蚀性差[12]，成为黄河泥沙的主要产区之一[13]，对我国生态环境的建设构成很大的威胁。因此，很多学者对该地区的土壤侵蚀机理展开大量的研究，主要从泥沙颗粒分选的搬运特征[14-15]和土壤不同的物理性质方面[16-18]去探究沙土二元结构的侵蚀机理。然而，目前对于沙土二元结构坡面的侵蚀产沙过程的研究主要集中在定性描述不同降雨与下垫面条件下侵蚀过程的差异，以及分析整体地形因子与产流产沙参数的相关性，多数学者发现二者为线性关系[10,19]，但在定量研究覆沙黄土坡面局部微地形因子与土壤侵蚀空间分布的响应方面涉及较少。鉴于此，本研究基于三维激光扫描技术获取的高精度数字高程模型（DEM），以覆沙黄土为研究对象，通过室内模拟降雨试验，分析降雨前后微地形在空间上的变化特征，探讨连续降雨条件下不同覆沙厚度的黄土坡面的侵蚀过程、土壤侵蚀空间分布特征，揭示微地形因子与土壤侵蚀之间的响应关系，以期为风水复合侵蚀区的坡面土壤侵蚀预测及侵蚀机理提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验用土为采集的西安市黄土和内蒙古达拉特旗东柳沟流域的沙样，将运回的土样和沙样过 10 mm 筛子。其中，黄土的机械组成为黏粒（<0.002 mm）1.36%，粉粒（0.002～0.02 mm）59.99%，砂粒（0.02～2 mm）38.65%；砂土的机械组成为黏粒 0.02%，粉粒 4.22%，砂粒 95.6%。装土时在槽底

① **收稿日期：**2019－07－16；　**修订日期：**2019－10－06
基金项目：国家自然科学基金（51779204）；陕西省创新人才推进计划项目科技（水土资源环境演变与调控）创新团队（2018TD-037）资助
作者简介：张建文（1995－），男，硕士生，主要从事土壤侵蚀方面研究
通讯作者：李鹏．E-mail：lipeng74@163.com

部铺20 cm厚的天然沙,再铺填40 cm过筛的黄土,每隔10 cm夯实1次,最后覆盖0.5 cm、1.0 cm和1.5 cm的沙,其中砂土按断面面积乘覆沙厚度的方法计算总覆沙体积,并将其人工摊平,尽可能保持每处厚度均一。槽内的土壤含水率控制在20%,干容重控制在1.3 g·cm^{-3}。装填完毕后,在土壤表面均匀洒水,使其表层含水量接近饱和,等待24 h后开始降雨试验。

1.2 试验设计

试验在西安理工大学雨洪侵蚀大厅进行。试验雨强为1.5 mm·min^{-1},降雨均匀度85%以上,用于降雨的侧喷式降雨器的有效降雨高度为4 m。根据对东柳沟流域风蚀沉积层沙层厚度的实地调研,设计覆沙厚度为0 cm、0.5 cm、1.0 cm、1.5 cm,其中0 cm为对照黄土坡面。产流30 min后停止降雨,每个设计连续降雨3次(由于覆沙1.5 cm坡面在第2场降雨后侵蚀到试验槽的底部,为了保证数据的准确性,没有再进行第3场降雨),降雨时间相隔24 h。试验采用的土槽长13 m,宽1 m,高0.7 m,土槽坡度为12°,试验装置如图1所示。

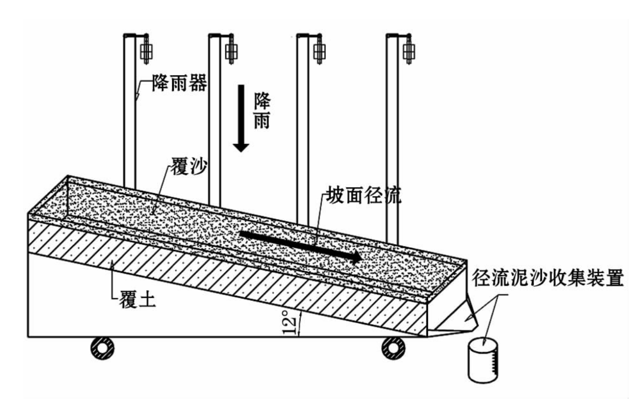


图1 降雨试验装置图

Fig.1 Experiment device of rainfall

1.3 数据处理及分析

在土槽出口产流后开始计时,每1 min用取样桶及锥形瓶收集1次径流泥沙样。试验结束后,读取桶中的坡面径流量;用置换法[20]计算其含沙量。坡面测流速用染色剂法($KMnO_4$),沿坡面水流方向每隔1 m布设观测断面,用于观测流速和水宽,使用公式(1)计算径流功率:

$$\omega = \tau V = \rho g s q \qquad (1)$$

式中:ω为径流功率,N·m^{-1}·s^{-1};τ为水流剪切力,Pa;ρ为水流密度,kg·m^{-3};g为重力加速度,m·s^{-2};s为坡降比;V为水流平均流速,m·s^{-1};q是单宽流量,m^2·s^{-1}。

每场降雨前后用三维激光扫描仪(Trimble FX,美国天宝)进行扫描,以获取坡面的点云数据,在20 m的范围内仪器的精度为2 mm。用Trimble Real Works对点云数据进行去噪、拼接、校准等处理,并建立在同一坐标系下,通过ArcGIS 10.1生成分辨率为5 mm×5 mm的坡面数字高程模型(DEM);对降雨前后的DEM做差,得到坡面空间点侵蚀前后的高差值,乘容重与面积以计算其侵蚀量。对DEM计算的侵蚀量和实测产沙量进行验证(图2),两者的误差为0.35%~14.84%。将试验钢槽的DEM分割成1 m×1 m坡段,共13段,从径流出口往上,依次为1 m,2 m,…,13 m坡段,得到每段的侵蚀量。

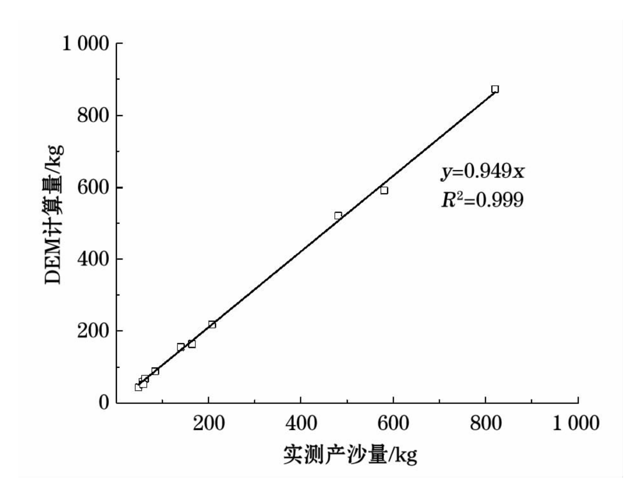


图2 实测产沙量与DEM计算量的比对

Fig.2 Comparison between measured sediment yield and amount of erosion by DEM

选取常用的坡度、地表粗糙度和地表切割深度3个地形因子来表征微地形特征[19,21]。计算方法如下:

(1) S是该点的坡度,指过该点的切平面与水平面的夹角,是高度变化的最大比率,表示地表面在该点的倾斜程度,用ArcGIS中的坡度函数来提取。

(2) R是指地表粗糙度(roughness),定义为地表单元曲面面积与其在水平面上的投影面积之比,用公式表示为:

$$R = S_{曲面}/S_{水平} \qquad (2)$$

通过化简之后得到计算式:

$$R = 1/\cos(S \times \pi/180) \qquad (3)$$

式中:S为分析窗口的坡度(°)。

(3) *SI* 指地面每一点的地表切割深度(the earth's surface incision),用公式表示为:

$$SI = H_{mean} - H_{min} \tag{4}$$

式中:H_{mean}为分析窗口内的平均高程,mm;H_{min}为分析窗口内的最小高程值,mm。

由于本研究中各微地形因子之间存在着很强的相关性,为了保证回归方程结果的合理性,采用岭回归分析来拟合微地形与侵蚀量之间的关系。岭回归(ridge regression)是一种用于分析共线性数据的有偏估计回归方法[22],它通过减弱方程的无偏性来提高各项系数的稳定性,得到更加符合实际情况的结果。

使用 ANOVA 方差分析来比较多组数据之间的差异性,采用 Pearson 相关分析法来分析数据的相关性。统计分析在 SPSS 22.0 中进行,绘图使用 ArcGIS 10.1 和 Origin 2017。

2 结果与分析

2.1 不同覆沙厚度下坡面含沙量的变化过程

坡面含沙量均随着降雨场次的增加呈减小的趋势(图 3)。在第 1 场降雨中,0.5 cm、1.0 cm 和 1.5 cm 覆沙厚度的坡面平均含沙量分别为黄土坡面的 7.46 倍、6.97 倍和 8.63 倍;第 2 场降雨的平均含沙量分别为黄土坡面的 4.04 倍、3.79 倍和 5.32 倍;第 3 场降雨的平均含沙量分别为黄土坡面的 2.14 倍(0.5 cm)和 1.70 倍(1.0 cm)。经过 ANOVA 方差分析,覆沙坡面的含沙量均显著高于黄土坡面($P<0.05$);对比不同覆沙厚度的含沙量变化,发现覆沙 0.5 cm 与 1.5 cm 之间、覆沙 1 cm 与 1.5 cm 之间的坡面含沙量有显著差异($P<0.05$)。而覆沙 0.5 cm 与 1 cm 的坡面含沙量无显著差异($P>0.05$)。可以看出,较黄土坡面,覆沙坡面的含沙量变化剧烈,主要原因是覆沙坡面的产流机制发生了改变,从黄土坡面的超渗产流变为假蓄满产流[23],产流前土壤基本接近饱和;另外,由于沙子特殊的物理性质,导致沙土二元结构脆弱,在水力和自身重力作用下,坡面更容易发生侵蚀和坍塌。因此,导致降雨过程中覆沙坡面含沙量的变化过程比黄土坡面剧烈。

2.2 坡面土壤侵蚀的空间分布特征

从图 4 可以看到,黄土坡面(覆沙 0 cm)细沟发育较为缓慢,3 场降雨后细沟发育到 5 m 坡段处;而覆沙坡面的细沟均发育到 10 m 以上的位置,形成的细沟曲折蜿蜒,形态复杂。黄土坡面侵蚀最严重区域随着降雨场次的增加而上移。覆沙坡面在首场降雨后发生全坡面大量产沙现象,在第 2 场、第 3 场降雨后侵蚀最严重的区域均出现在坡面中部偏下的位置(2~5 m 坡段)。

随着降雨场次的增加,坡面侵蚀量明显降低(图 5),主要原因是砂粒与土壤细颗粒大部分在第 1 场降雨中流失掉,破碎的沙层难以存储径流,导致后续降雨的初始产流时间提前,入渗量减少,土壤抗蚀性增强;同时表层的黄土暴露出来,在降雨过程中逐渐形成结皮,提升了土壤的抗蚀力,导致土壤侵蚀量减少。另外,通过分析不同坡段的土壤侵蚀量,发现随着降雨场次的增加,黄土坡面侵蚀峰值区域向坡上方向移动,分别出现在 2~3 m、3~4 m 和 4~5 m 坡段(图 5a),主要产沙区长度为 3 m。坡面覆沙后,侵蚀量明显增加,主要产沙区长度增加为 9 m。总体来看,坡面中下部(1~6 m)的产沙量大于坡面中上部(7~13 m),侵蚀峰值区域多分布在坡面 4~

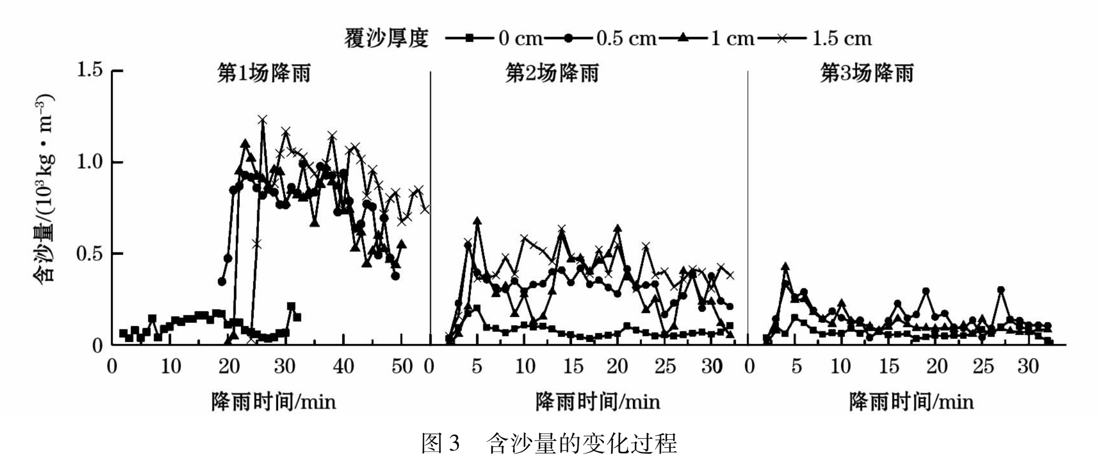
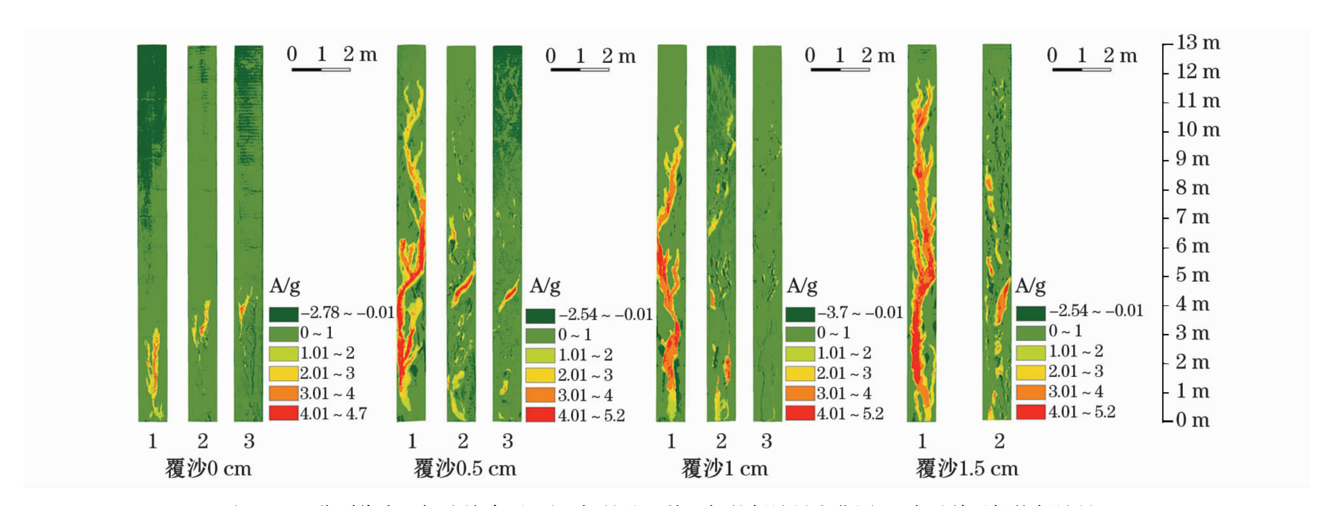


图 3 含沙量的变化过程

Fig. 3 Variation process of sediment concentration



注:1,2,3 分别代表3场连续降雨,后一场是基于前一场的侵蚀量变化图;A 表示单元栅格侵蚀量。

图4　土壤侵蚀分布

Fig. 4　Soil erosion distribution

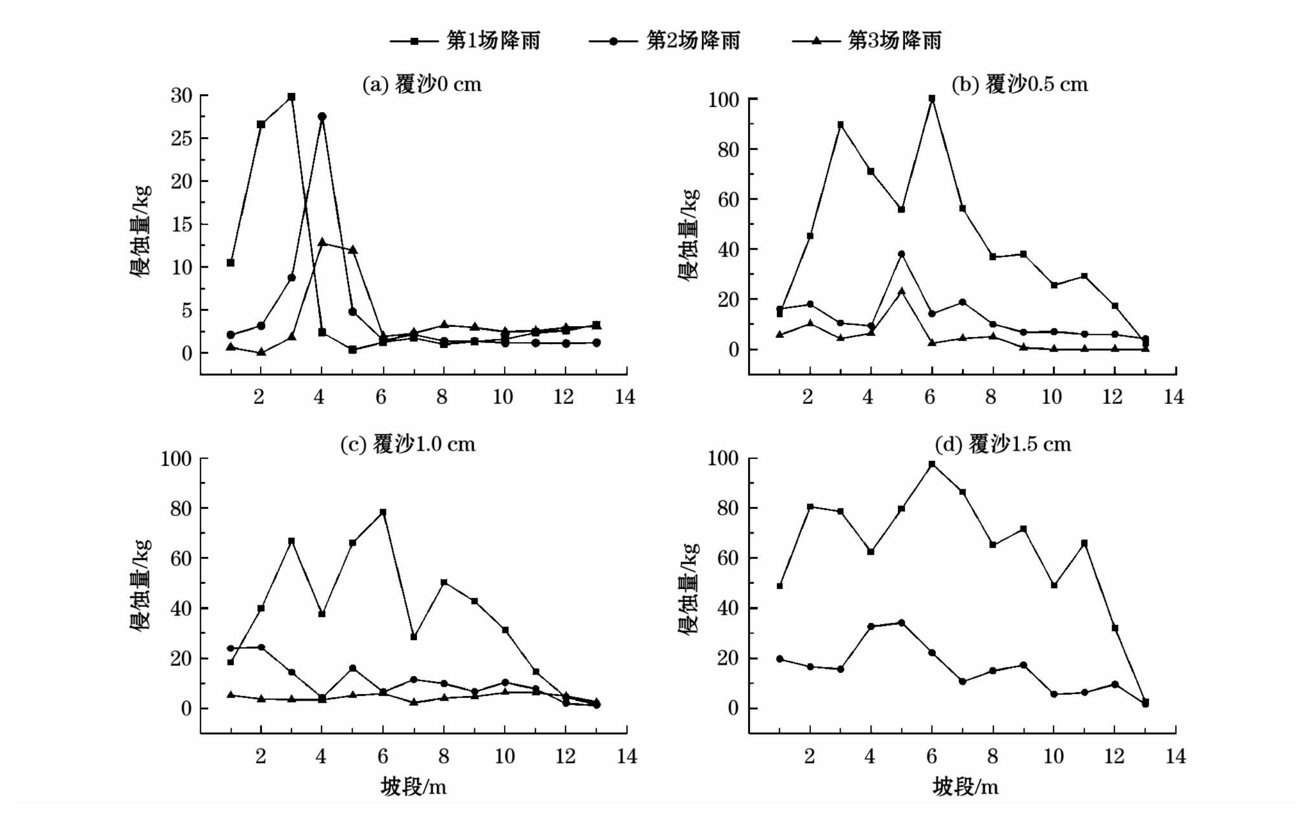


图5　不同坡段土壤侵蚀分布特征

Fig. 5　Distribution characteristics of soil erosion on different slope positions

6 m 坡段。说明在连续降雨过程中,坡面中下部是最容易遭受到水流侵蚀的部位,因此,对于黄土和覆沙黄土两种坡面侵蚀的治理,中下坡段比中上坡段更重要。

2.3　坡面微地形空间变化

黄土坡面粗糙度表现为第3场降雨 > 第2场降雨 > 第1场降雨 > 初始坡面(图6a),较初始坡面,3场降雨的粗糙度增幅分别为5.34%、7.04%和8.34%,3场降雨之间1 ~ 6 m坡段的粗糙度存在显著差异($P < 0.05$),7 ~ 13 m坡段无显著变化。覆沙0.5 cm坡面3场降雨后的粗糙度较初始坡面的增幅分别为15.66%、16.94%和18.16%(图6b);覆沙1 cm后,粗糙度增幅分别为13.34%、16.45%和14.25%(图6c);覆沙1.5 cm后,增幅分别为16.06%和15.29%(图6d)。说明覆沙后坡面地表变化更加剧烈,但在连续3场降雨中的坡面粗糙度

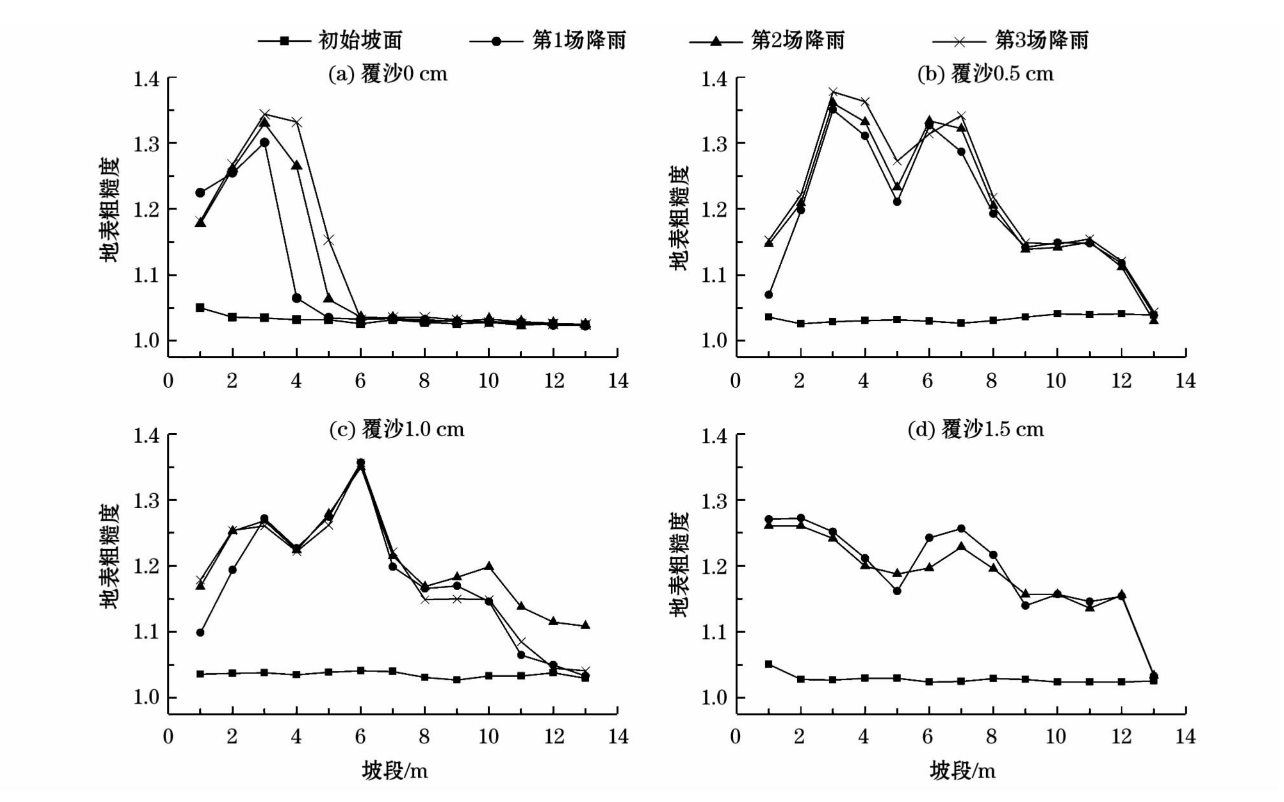


图 6　不同覆沙厚度下地表粗糙度的变化特征

Fig. 6　Variation characteristics of slope roughness under different sand thickness

无显著差异($P>0.05$)。

2.4　土壤侵蚀与微地形因子的响应关系

对 3 个地形因子的变幅和侵蚀量作相关性分析,结果如表 1 所示。

从表 1 可以看到,黄土坡面各地形因子与坡面

表 1　微地形变幅与侵蚀量的相关性

Tab. 1　Correlation between micro-topographic amplitude and erosion

覆沙厚度/cm	场次	坡度/(°)	地表粗糙度	地表切割深度/mm	径流功率/(N·m^{-1}·s^{-1})
	1	0.955**	0.958**	0.970**	0.641*
0	2	0.954**	0.958**	0.959**	0.604*
	3	0.840**	0.921**	0.872**	0.596*
	1	0.954**	0.957**	0.964**	0.584*
0.5	2	0.537	0.458	0.547	0.626*
	3	−0.243	0.644*	−0.214	0.528
	1	0.826**	0.951**	0.963**	0.833**
1	2	−0.391	0.079	−0.474	0.804*
	3	−0.120	−0.210	−0.171	0.045
	1	0.786**	0.735**	0.779**	0.805**
1.5	2	−0.144	0.092	0.013	0.568*
	3	–	–	–	–

注:* 表示在 0.05 水平上显著相关;** 表示在 0.01 水平上显著相关;– 表示未测数据。

侵蚀量均为极显著相关,但两者之间的相关关系随着降雨场次的增加而减弱。主要原因是在首次降雨后,地表的形态及汇流路径的雏形已经形成,降雨过程中产生的结皮增加了土壤的抗侵蚀能力,减弱了微地形的变化幅度,因此两者相关性随着降雨场次的增加而减弱。而仅仅在首次降雨时,覆沙坡面微地形因子变幅与侵蚀量表现出相关性,相关系数 0 cm(黄土坡面)>0.5 cm>1 cm>1.5 cm,覆沙厚度的增加减弱了二者的相关性,而在后续的降雨中没有相关性。

由于黄土坡面与覆沙坡面产沙机制的不同,因此分别研究其侵蚀产沙与微地形变化之间的关系。根据每个 1 m×1 m 坡段的微地形变化量和侵蚀量,建立岭回归方程。其中,黄土坡面数据来源于 3 场连续降雨过程,覆沙黄土坡面数据来源于 3 个不同覆沙厚度下的 3 场连续降雨过程。得到的标准化回归模型如下:

黄土坡面:$Y=0.225\Delta S+0.286\Delta R+0.425\Delta SI$ ($R^2=0.903, P<0.01, N=39$)　(5)

覆沙坡面:$Y=0.259\Delta S+0.616\Delta R$ ($R^2=0.788, P<0.01, N=104$)　(6)

模型中:Y 代表每个 1 m×1 m 坡段的侵蚀量(kg);

ΔS 代表该坡段坡度变幅(°);ΔR 代表该坡段地表粗糙度变幅;ΔSI 代表该坡段地表切割深度变幅(mm)。

方程表明,在黄土坡面,ΔSI 对侵蚀产沙的响应最为强烈,其次为 ΔR,最后是 ΔS;而在覆沙坡面,ΔR 对侵蚀产沙的响应最为强烈,ΔS 次之。黄土坡面回归方程决定系数为 0.903,覆沙坡面回归方程决定系数为 0.788,各系数在统计学上均具有显著意义($P<0.05$)。黄土坡面的拟合效果优于覆沙坡面,说明覆沙坡面微地形变化与侵蚀产沙的互动关系较为复杂,需要加入其他更加敏感的因素和指标来综合分析。

3 讨 论

3.1 覆沙坡面土壤侵蚀与微地形变化的响应

黄土具有较好的结构和黏性,在降雨过程中的坡面侵蚀遵循溅蚀—片蚀—细沟侵蚀的规律,形成雨滴和水流剥蚀土壤颗粒、径流搬运泥沙的产沙模式。而覆沙黄土坡面土壤结构松散,表层颗粒之间黏性较差且孔隙较大,导致该类型的土壤遇水即碎[24],雨水会在沙层中形成沙土界面流[16]。覆沙坡面一般遵循垂直入渗—潜流—渗流侵蚀—坍塌的侵蚀规律,正因如此,覆沙坡面形态多变,坍塌随时发生。而覆沙坡面微地形变幅与侵蚀量之间只有在首场降雨时具有一定的相关性,第 2 场、第 3 场降雨没有相关性。通过分析整个连续降雨系列,发现整体相关性较好,侵蚀量与微地形变幅之间服从线性关系。以覆沙 0.5 cm 坡面的降雨系列为例(图 7),出现这种差别主要是因为首场降雨时微地形变幅和侵蚀量最大,控制了总体数据的分布形态,后续的降雨造成的微地形变幅和侵蚀量相对第 1 场降雨较小,对总体趋势影响较弱。

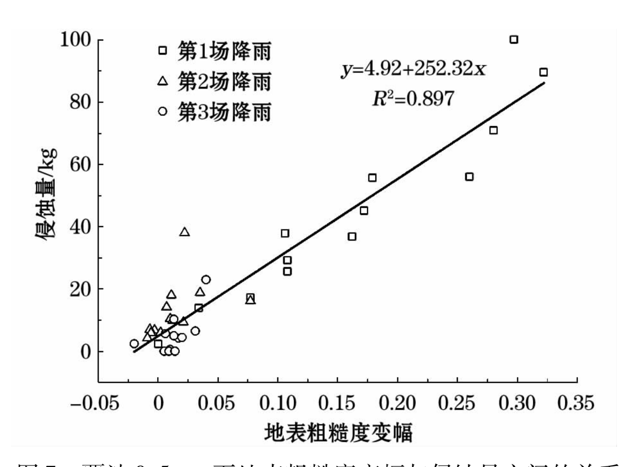


图 7 覆沙 0.5 cm 下地表粗糙度变幅与侵蚀量之间的关系

Fig. 7 Relationship between roughness variation and erosion amount under sand cover 0.5 cm

3.2 水动力因子对回归模型的影响

土壤侵蚀除受地形因素的影响外,水流的动力特性也是影响侵蚀的一个重要因子。研究发现,径流功率能够很好地应用于径流侵蚀产沙的计算[25-26],因此,采用径流功率来表示土壤受到水流冲刷的作用大小。

根据径流功率与侵蚀量的相关分析结果(表 1),将径流功率作为自变量加入到岭回归方程中,发现黄土坡面回归模型不再变化,覆沙坡面的标准化回归模型变为式(7)。

覆沙坡面:$Y=0.255\omega+0.264\Delta S+0.469\Delta R$ ($R^2=0.831, P<0.01, N=104$) (7)

式中:ω 表示每个 1 m 坡段的径流功率($N\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$),其余字母含义同上。

可以看到在考虑径流功率的影响后,覆沙坡面回归方程的决定系数由 0.788 提高到 0.831,模型与标准化系数均显著($P<0.05$),说明覆沙坡面的侵蚀量受径流功率的影响显著。黄土坡面的回归模型不变,说明径流功率不是提高式(5)精度的因素。

前人对侵蚀过程中微地形与侵蚀产沙量的响应关系研究,主要集中在两者变化特征及单一因子的相关性分析[19,27-28],本文以更加精细的 1 m×1 m 坡段为研究单元,分析了坡面侵蚀量的空间分布,建立了微地形因子变幅与侵蚀空间分布之间的响应关系,并发现建立的覆沙坡面回归模型加入水流动力因子后能够提高模型的精度,说明在后续的研究中还需要其他敏感因素的加入才能提高其精度。由于本试验的条件有限,未能涉及到覆沙层内部或外部其他因素,因此,在后续的研究中应考虑其他因素的综合影响。

4 结 论

(1) 连续降雨下,坡面平均含沙量随着降雨场次的增加而明显减小。在同一降雨场次下,覆沙 0.5 cm 与1.5 cm 之间、覆沙 1 cm 与 1.5 cm 之间的坡面含沙量变化过程具有显著差异($P<0.05$)。

(2) 在连续降雨过程中,坡面中下部是最容易遭受到水流侵蚀的部位。侵蚀峰值区域也多分布在坡面 4~6 m 坡段,说明对于坡面侵蚀的防治,中下

坡段的治理比中上坡段更重要。

(3) 黄土坡面上的微地形因子随着降雨的进行而逐渐增大,覆沙坡面微地形指标总体上大于黄土坡面,每个覆沙厚度下的3场降雨之间微地形因子无显著差异($P>0.05$)。

(4) 黄土坡面侵蚀响应最强烈的微地形因子是地表切割深度,覆沙坡面侵蚀响应最强烈的微地形因子是地表粗糙度。黄土坡面回归方程的决定系数($R^2=0.903$)较好于覆沙坡面($R^2=0.788$)。对于覆沙坡面侵蚀响应机制的研究,还需要加入其他较为敏感的指标来综合分析。

参考文献(References):

[1] Penuela, Andrés, Javaux M, et al. How do slope and surface roughness affect plot-scale overland flow connectivity? [J]. Journal of Hydrology, 2015, 528: 192-205.

[2] Rai R K, Alka Upadhyay, Singh V P. Effect of variable roughness on runoff[J]. Journal of Hydrology, 2010, 382(1-4): 115-127.

[3] Gómez J A, Nearing M A. Runoff and sediment losses from rough and smooth soil surfaces in a laboratory experiment[J]. Catena, 2005, 59(3): 253-266.

[4] Zhao L S, Liang X L, Wu F Q. Soil surface roughness change and its effect on runoff and erosion on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Arid Land, 2014, 6(4): 400-409.

[5] Frédéric Darboux, Huang C H. Does soil surface roughness increase or decrease water and particle transfers? [J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(3): 748-756.

[6] Huang C H, Bradford J M. Depressional storage for Markov-Gaussian surfaces[J]. Water Resources Research, 1990, 26(9): 2235.

[7] 郑子成,秦凤,李廷轩. 不同坡度下紫色土地表微地形变化及其对土壤侵蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 168-175. [Zheng Zicheng, Qin Feng, Li Tingxuan. Changes in soil surface microrelief of purple soil under different slope gradients and its effects on soil erosion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(8): 168-175.]

[8] 唐辉,李占斌,李鹏,等. 黄土坡面产流产沙过程及微地形变化特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1708-1712. [Tang Hui, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Runoff, sediment yield and micro-topography of Loess slope under artificial rain[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(6): 1708-1712.]

[9] 赵龙山,张青峰,王健,等. 黄土坡面不同微坡位上糙度对降雨侵蚀的响应[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 637-642. [Zhao Longshan, Zhang Qingfeng, Wang Jian, et al. Effect of soil surface roughness on rainfall erosion as affected by slope position on Loess slope[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(4): 637-642.]

[10] 王莹,郑子成,李廷轩,等. 水蚀过程中玉米生长季横垄坡面地表糙度变化及其与侵蚀量的关系[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(6): 31-37. [Wang Ying, Zheng Zicheng, Li Tingxuan, et al. Change of soil surface roughness during maize growing season and its relationship with soil erosion amount on slope of contour tillage during water erosion process[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(6): 31-37.]

[11] 张利超,杨伟,李朝霞,等. 激光微地貌扫描仪测定侵蚀过程中地表糙度[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22): 155-162. [Zhang Lichao, Yang Wei, Li Zhaoxia, et al. Quantification of soil surface roughness during soil erosion using laser micro-topographical scanner[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(22): 155-162.]

[12] 赵影,董爽,贾玉华. 陕北六道沟流域切沟形态复杂性及其类型划分[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1292-1299. [Zhao Ying, Dong Shuang, Jia Yuhua. Morphological complex and classification of gullies in the Liudaogou minor drainage basin in North Shaanxi Province[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(5): 1292-1299.]

[13] 查轩,唐克丽. 水蚀风蚀交错带小流域生态环境综合治理模式研究[J]. 自然资源学报, 2000, 15(1): 97-100. [Cha Xuan, Tang Keli. Study on comprehensive control model of small watershed eco-environment in water and wind crisscrossed erosion zone[J]. Journal of Natural Resources, 2000, 15(1): 97-100.]

[14] 汤珊珊,李鹏,任宗萍,等. 模拟降雨下覆沙坡面侵蚀颗粒特征研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 39-47. [Tang Shanshan, Li Peng, Ren Zongping, et al. Particle size composition of sediment from sand-covered slope under simulated rainfall[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(1): 39-47.]

[15] Xu G C, Tang S S, Lu K X, et al. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on sand-covered slopes in a region subject to wind-water erosion[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(3): 2523-2530.

[16] 谢林妤,白玉洁,张风宝,等. 沙层厚度和粒径组成对覆沙黄土坡面产流产沙的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 60-72. [Xie Linshu, Bai Yujie, Zhang Fengbao, et al. Effects of thickness and particle size composition of overlying sand layer on runoff and sediment yield on sand-covered Loess slopes[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(1): 60-72.]

[17] 武秀荣,张风宝,王占礼. 片沙覆盖黄土坡面沙土二元结构剖面土壤物理性质变化研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 190-193, 210. [Wu Xiurong, Zhang Fengbao, Wang Zhanli. Variation of sand and Loess properties of binary structure profile in Hilly region covered by sand of the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(6): 190-193, 210.]

[18] 王子豪,张风宝,杨明义,等. 水蚀风蚀交错区退耕坡面植被利用对产流产沙的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 3907-3916. [Wang Zihao, Zhang Fengbao, Yang Mingyi, et al. Effect of vegetation utilization on runoff and sediment production on grain-for-green slopes in the wind-water erosion crisscross region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(12): 3907-3916.]

[19] 唐辉,李占斌,李鹏,等. 模拟降雨下坡面微地形量化及其与产流产沙的关系[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 127-133. [Tang Hui, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Surface micro topography quantification and its relationship with runoff and sediment under simulated rainfall[J]. Transactions of the Chinese Society of Agri-

cultural Engineering,2015,31(24):127－133.]

[20] 郝好鑫,郭忠录,王先舟,等. 降雨和径流条件下红壤坡面细沟侵蚀过程[J]. 农业工程学报,2017,33(8):134－140.[Hao Haoxin,Guo Zhonglu,Wang Xianzhou,et al. Rill erosion process on red soil slope under interaction of rainfall and scouring flow[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2017,33(8):134－140.]

[21] 李锐,赵牡丹,杨勤科. 中国土壤侵蚀地图集[M]. 北京:中国地图出版社,2014:180－215.[Li Rui,Zhao Mudan,Yang Qinke. Atlas of Soil Erosion in China[M]. Beijing:China Cartographic Publishing House,2014:180－215.]

[22] 张智韬,王海峰,Karnieli Arnon,等. 基于岭回归的土壤含水率高光谱反演研究[J]. 农业机械学报,2018,49(5):240－248.[Zhang Zhitao,Wang Haifeng,Karnieli Arnon,et al. Inversion of soil moisture content from hyperspectra based on ridge regression[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(5):240－248.]

[23] 汤珊珊,李占斌,任宗萍,等. 覆沙坡面产流产沙过程试验研究[J]. 水土保持学报,2015,29(5):25－28.[Tang Shanshan,Li Zhanbin,Ren Zongping,et al. Experimental study on the process of runoff and sediment yield on sand-covered slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2015,29(5):25－28.]

[24] 马玉凤,严平,杨玉辉,等. 内蒙古孔兑区叭尔洞沟风水交互侵蚀作用下河谷地貌的演化规律[J]. 干旱区研究,2019,36(5):1280－1291.[Ma Yufeng,Yan Ping,Yang Yuhui,et al. Valley landform evolution under aeolian-fluvial joint erosion in the Baerdong River Basin in Inner Mongolia,China[J]. Arid Zone Research,2019,36(5):1280－1291.]

[25] 李鹏,李占斌,郑良勇,等. 坡面径流侵蚀产沙动力机制比较研究[J]. 水土保持学报,2005,19(3):66－69.[Li Peng,Li Zhanbin,Zheng Liangyong,et al. Comparisons of dynamic meachanics of soil erosion and sediment yield by runoff on Loess Slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2005,19(3):66－69.]

[26] 崔文滨,李鹏,李占斌,等. 径流功率理论在黄土坡面侵蚀产沙计算中的应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2005,33(9):103－107.[Cui Wenbin,Li Peng,Li Zhanbin,et al. Application of unit runoff power theory for sediment yield calculation on loess slope[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition),2005,33(9):103－107.]

[27] 吴发启,郑子成. 坡耕地地表糙度的量测与计算[J]. 水土保持通报,2005,25(5):71－74.[Wu Faqi,Zheng Zicheng. Measure and calculation of surface roughness on slope farmland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2005,25(5):71－74.]

[28] 高树静,赵龙山,梁心蓝. 人工降雨条件下坡耕地地表糙度的时空变异分布研究[J]. 水土保持研究,2010,17(3):12－16.[Gao Shujing,Zhao Longshan,Liang Xinlan. Surface roughness spatiotemporal distribution of the slope land under simulated rainfall[J]. Research of Soil and Water Conservation,2010,17(3):12－16.]

Response relationship between micro-relief variation and slope erosion under sand-covered conditions

ZHANG Jian-wen, LI Peng, GAO Hai-dong, YANG Qian-nan, LIU Zhan

(*Key Laboratory of National Forestry Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions*, *Xi'an University of Technology*, *Xi'an* 710048, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: The development of the slope of micro-relief reflects the intensity and process of erosion. To quantitatively study the response between the characteristics of micro-relief variation and the amount of erosion, three consecutive rainfall tests with simulated precipitation of 1.5 mm · min^{-1} were conducted, and the spatial variation characteristics of micro-relief and soil erosion were analyzed using 3－D laser-scanner technology. The relationship between the amplitude of micro-relief and erosion was well fitted. The results showed that average sediment concentrations on the slope were reduced as the number of rainfall events increased. The lengths of the main sand-predicted area on the sand-covered slope were about three times that of the loess slope, and peaks of the amount of erosion of the slope were mostly found at the position of 4－6 m on the slope, but the peaks of erosion on the loess slope were found in the position of 3－4 m. As the rainfall simulation progressed, the micro-relief factors of the loess slope increased significantly ($P < 0.05$), and the micro-relief factors of the sand-covered slope increased, but not significantly ($P > 0.05$). The study found that the micro-relief factors with the strongest erosion response to the loess slope and the sand-covered slope were surface incision and surface roughness, respectively. The response relationship between micro-relief variation and erosion of the loess slope was stronger than for the sand-covered slope, so the sand-covered slope should be examined for other sensitive indicators to optimize the equation. This study provides reference information for determining the erosion mechanism of wind-water erosion across the region.

Key words: sand-covered slope; erosion; spatial distribution; micro-relief; sand content; soil erosion